

⑬ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 197 05 017 A 1**

⑤ Int. Cl.⁶
G 06 K 9/46
G 06 T 9/00

⑳ Aktenzeichen: 197 05 017.4
㉔ Anmeldetag: 10. 2. 97
㉕ Offenlegungstag: 13. 8. 98

DE 197 05 017 A 1

㉑ Anmelder:

Delphi Systemsimulation GmbH, 80331 München,
DE

㉒ Vertreter:

Kuhnen, Wacker & Partner, Patent- und
Rechtsanwälte, 85354 Freising

㉓ Erfinder:

Baatz, Martin, Dr., 80799 München, DE; Binnig,
Gerd, Dr., Wollerau, CH; Eschenbacher, Peter, Dr.,
91077 Neunkirchen, DE; Melchinger, Andreas, Dr.,
89173 Lonsee, DE; Sögtrop, Michael, 85586 Poing,
DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

㉔ Verfahren zum Segmentieren eines digitalen Bildes

㉕ Es wird ein Verfahren zum Segmentieren eines aus einer Vielzahl einzelner Bildelemente (Pixel) bestehenden digitalen Bildes offenbart, bei dem insbesondere zur digitalen Bildverarbeitung und/oder zur Objekt- und/oder Mustererkennung Bildsegmente dadurch gebildet werden, daß immer dann einzelne benachbarte Bildelemente und/oder Bildsegmente zusammengefaßt oder bereits gebildete Bildsegmente durch Abspaltung von Bildelementen und/oder Teil-Bildsegmenten modifiziert werden, wenn ein Merkmal oder mehrere Merkmale benachbarter Bildelemente bzw. Bildsegmente anhand bestimmter Homogenitätskriterien als übereinstimmend (gleich oder ähnlich) bzw. als nicht übereinstimmend eingestuft werden. Zur Erzielung optimaler Ergebnisse schlägt die Erfindung vor, als Homogenitätskriterium für jedes betrachtete Merkmal eine Toleranz heranzuziehen, innerhalb der sich die Merkmalswerte der beiden betroffenen Bildelemente bzw. Bildsegmente unterscheiden dürfen, wobei die Segmentierung iterativ über alle Bildelemente bzw. Bildsegmente wiederholt durchgeführt wird.

DE 197 05 017 A 1

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Segmentieren eines aus einer Vielzahl einzelner Bildelemente (Pixel) bestehenden digitalen Bildes gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1. Im einzelnen betrifft die Erfindung ein Verfahren, bei dem insbesondere zur digitalen Bildverarbeitung und/oder zur Objekt- und/oder Mustererkennung Bildsegmente dadurch gebildet werden, daß immer dann einzelne benachbarte Bildelemente und/oder Bildsegmente zusammengefaßt oder bereits gebildete Bildsegmente durch Aufnahme/Abspaltung von Bildelementen und/oder von Teil-Bildsegmenten modifiziert werden, wenn ein Merkmal oder mehrere Merkmale der betroffenen Bildelemente bzw. Bildsegmente anhand bestimmter Homogenitätskriterien als übereinstimmend (d. h. als gleich oder ähnlich) bzw. als nicht übereinstimmend eingestuft werden.

Mit der Erfindung soll ein neuartiges Verfahren zum Segmentieren in der digitalen Bildverarbeitung geschaffen werden, das bei geringem Vorwissen über das jeweilige Bild und die darin enthaltenen Muster und Objekte mit Hilfe von Homogenitätskriterien, die laufend objektbezogen modifiziert werden, die Segmentierung in fortgesetzten Bearbeitungsschritten optimiert.

In den meisten Anwendungsbereichen der digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung ist es notwendig, zusammengehörige Strukturen in einem Bild, das aus einer Vielzahl einzelner Bildelemente (Bildpunkte oder Pixel) besteht, zu erkennen und zu klassifizieren. Daher besteht ein wichtiger Schritt in der Zusammenfassung von zusammengehörigen, benachbarten Bildelementen zu zusammenhängenden Bildsegmenten. Dieser Prozeß wird als Segmentieren bezeichnet.

Die wesentlichen Kriterien für das Segmentieren von Bildelementen sind Nachbarschaftlichkeit und Ähnlichkeit von Merkmalen, wobei Ähnlichkeiten häufig über die gleiche Klassifikation von Bildelementen definiert werden.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird die Ähnlichkeit von Bildelementen und Bildsegmenten über Homogenitätskriterien definiert. Ziel des Segmentierens ist es dabei, alle zusammenhängend erscheinenden Bildstrukturen in Segmenten zusammenzufassen und nicht zusammengehörige Strukturen zu trennen.

Eine spezielle Schwierigkeit bei dieser Technik des Segmentierens entsteht durch die Textur von Bildbereichen, wie sie praktisch in allen digitalen Bildern in unterschiedlichster Ausprägung auftritt. Charakteristisch sind praktisch alle Objekttypen mehr oder minder texturiert. Solch eine Textur ist neben anderen Eigenschaften wie Körnigkeit oder Strich wesentlich gekennzeichnet durch eine mehr oder weniger starke Merkmalsverteilung, wie z. B. eine Grauwert- oder Farbverteilung.

Solche Verteilungen von Merkmalswerten können für unterschiedliche Objekte größer oder kleiner sein, und sie können sich auch überlappen; beispielsweise ist in Fig. 1 ein Fall dargestellt, bei dem insgesamt sechs Objekte gezeigt sind, die jeweils einen unterschiedlich großen Grauwertbereich (dessen Werteskala zwischen 0 und 256 liegt) aufweisen, wobei sich der jeweilige Grauwertbereich der oben dargestellten Objekte mit dem der darunter dargestellten Objekte ganz oder teilweise überlappt.

Dies macht bei der Segmentierung erhebliche Schwierigkeiten, da auf der einen Seite auch texturhafte Objekte – mit zum Teil sehr unterschiedlichen Merkmalswerten – vollständig segmentiert werden sollen, während auf der anderen Seite die Segmentierung generell aufgrund von Merkmalsähnlichkeiten erfolgt. Sind die Merkmalsunterschiede innerhalb eines Objektes zu groß, wird das Segmentieren aufgrund von Merkmalsähnlichkeit problematisch. Gleichzeitig ist es generell schwierig, zwei benachbarte Objekte, deren Merkmalsverteilungen sich überlappen, voneinander zu trennen.

Bei vielen herkömmlichen Segmentierungsverfahren, die ohne Klassifikation der Bildelementen arbeiten, wird die Ähnlichkeit (Zugehörigkeit) zwischen Bildelementen und Bildsegmenten anhand von vordefinierten Homogenitätskriterien bestimmt. Typische Vertreter dieser bekannten Verfahren sind sogenannte ein- oder mehrdimensionale Schwellwertverfahren, bei denen der Merkmalsraum, der durch die Merkmale der Bildelemente aufgespannt wird, in Teilbereiche eingeteilt wird. Das Homogenitätskriterium ist bei diesen bekannten Verfahren dann erfüllt, wenn die Bildelemente in demselben Teilbereich liegen. So kann man z. B. die 256 Graustufen, in denen ein digitalisiertes Bild häufig vorliegt, in 16 Bereiche mit jeweils 16 Grauwerten einteilen. Liegen zwei benachbarte Bildelemente in dem gleichen Grauwertbereich, so werden sie als ähnlich bewertet und daher segmentiert. Dies löst die oben beschriebenen Schwierigkeiten aber oft nur sehr unzureichend: werden bestimmte Objekte durch die Einteilung der Bereiche gut beschrieben, so kann diese Einteilung für andere Objekte völlig fehlschlagen.

Die eingangs erwähnten Verfahren, bei denen eine Pixelklassifikation durchgeführt wird, arbeiten in der Weise, daß durch Vorwissen bekannte Intervalle oder Verteilungen im Merkmalsraum festgelegt werden, die für bestimmte Objekttypen charakteristisch sind. In diesem Fall werden die untersuchten Bildelemente jeweils derjenigen Klasse zugeordnet, zu der sie aufgrund ihres Vektors im Merkmalsraum die größte Zugehörigkeitswahrscheinlichkeit aufweisen. Das Homogenitätskriterium ist in diesem Fall die Zugehörigkeit zu derselben Klasse. Abgesehen von der Tatsache, daß über einzelne Bildelemente eine viel geringere Information für die Klassifikation zur Verfügung steht als über Bildsegmente, entsteht eine besondere Schwierigkeit bei der Bearbeitung von Luft- und Satellitenbildern dadurch, daß die Verteilung der Merkmale für bestimmte Objekttypen sehr stark abhängt vom Wetter, von der Tages- und Jahreszeit und von den Lichtverhältnissen zum Zeitpunkt der Bildaufnahme. Dementsprechend ist es sehr schwierig, typische Verteilungen für bestimmte Objektklassen im Merkmalsraum geeignet vorzudefinieren.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Segmentierungsverfahren der im Oberbegriff des Anspruchs 1 angegebenen Art derart weiterzubilden, daß eine hervorragende Segmentierung bzw. Objekterkennung auch dann gewährleistet ist, wenn die betreffenden Objekte überlappende Merkmalsbereiche aufweisen oder durch solche Merkmalswerte geprägt sind, die bei unterschiedlichen Bedingungen stark schwanken.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß mit den im Kennzeichnungsteil des Anspruchs 1 angegebenen Verfahrensschritten gelöst.

Die Erfindung schlägt demnach vor, als Homogenitätskriterium für jedes betrachtete Merkmal eine Toleranz heranzuziehen, innerhalb der sich die Merkmalswerte der beiden betroffenen Bildelemente bzw. Bildsegmente unterscheiden dürfen, wobei die Segmentierung über alle Bildelemente bzw. Bildsegmente iterativ wiederholt durchgeführt wird. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

Aufgrund dieser Maßnahmen unterscheidet sich das erfindungsgemäße Verfahren wesentlich insbesondere von all denjenigen bekannten Verfahren, bei denen zunächst jedes einzelne Pixel klassifiziert wird und erst dann die als gleich klassifizierten benachbarten Pixel zu Segmenten zusammengefaßt werden.

Im Gegensatz dazu segmentiert das erfindungsgemäße Verfahren ein digitales Bild weitgehend vorwissensfrei und ohne Klassifikation der einzelnen Bildelemente. Die Segmentierung erfolgt aufgrund ähnlicher Struktureigenschaften. Mit den so erhaltenen Segmenten steht wesentlich mehr Information für eine Klassifikation zur Verfügung, als dies bei einzelnen Bildpunkten der Fall ist, nämlich Information über Textur- und Formeigenschaften der segmentierten Objekte. Damit ist das erfindungsgemäße Verfahren generell geeignet, als Basis für eine weitere Klassifikation die damit möglichen Klassifikationswahrscheinlichkeiten in vielen Anwendungsgebieten zu erhöhen.

Nachfolgend seien die wesentlichen Gesichtspunkte der Erfindung, die aus der sich anschließenden Figurenbeschreibung noch deutlich werden, kurz diskutiert:

Die Homogenitätskriterien werden erfindungsgemäß in Form von Toleranzen definiert, anhand derer festgestellt wird, inwieweit Merkmalsunterschiede noch als ähnlich oder eben nicht mehr als ähnlich bewertet werden.

- Diese Homogenitätskriterien (Toleranzen) werden immer wieder neu objektbezogen anhand der Eigenschaften der beteiligten Objekte modifiziert.

- Die Bearbeitung der Bildelemente und Segmente erfolgt in stochastischer Reihenfolge. Segmentveränderungen werden durch Aufnahme von Bildelementen oder Bildsegmenten auf einer tieferen Ebene, durch Segmentfusion und durch Randkorrektur erreicht.

- Der jeweilige Segmentierungszustand wird in mehrfachen Bearbeitungszyklen solange wiederholt, bis das Ergebnis trotz weiterer Bearbeitung stabil bleibt, d. h. einer optimalen Segmentierung entspricht.

- Die Segmentierung kann in einer hierarchischen Weise vorgenommen werden, so daß zumindest Bildelemente zu einem Bildsegmenten zusammengefaßt werden; es können aber auch Bildsegmente in mehrfacher hierarchischer Weise zu übergeordneten Bildsegmenten zusammengefaßt werden, die dann die Bildstrukturen in einer größeren bzw. zusammenfassenderen Weise wiedergeben.

- Die Verfahren Segmentfusion, Randkorrektur und Abstoßen Segmentbestandteilen werden auf allen Ebenen der hierarchischen Objektstruktur in gleicher (fraktaler) Weise durchgeführt.

Im Unterschied zu herkömmlichen Verfahren sind die Homogenitätskriterien erfindungsgemäß nicht ausschließlich global parametrisiert (ein globaler Parameter kann z. B. eine allgemeine Toleranzschärfe für das gesamte Bild sein). Statt dessen werden die in den Homogenitätskriterien festgelegten Toleranzen zusätzlich in sinnvoller Weise durch Eigenschaften der beteiligten Objekte modifiziert. Bestimmte Parameter in den Homogenitätskriterien beziehen sich also auf lokale (Objekt-) Eigenschaften. Diese jeweilige Objektbezogenheit der Homogenitätskriterien gemeinsam mit der Behandlung der Bildelemente oder Bildsegmente in einer stochastischen Reihenfolge sind Ursache für eine Geschichtlichkeit und eine Nichtdeterminiertheit des erfindungsgemäßen Verfahrens. Das wiederum ist die Voraussetzung für ein evolutionäres Vorgehen in mehrfachen Bearbeitungszyklen. Gleichzeitig wird aber mit der lokalen Parametrierung der Homogenitätskriterien und der Offenheit des Verfahrens eine wesentlich höhere Informationsverdichtung erreicht, als mit einer deterministischen Vorgehensweise möglich wäre.

Die folgende Beschreibung des Verfahrens bezieht sich auf eine Segmentierung mit einfacher Objektstruktur, in der Bildelemente einfach zu Bildsegmenten zusammengefaßt werden.

Zu Beginn des erfindungsgemäßen Verfahrens werden Segment-Keimzellen über das Bild gestreut. Diese Keimzellen können wachsen, indem sie passende Bildelemente aufnehmen. Stoßen zwei Segmente aneinander, wird überprüft, ob sie ähnlich sind und gegebenenfalls fusioniert werden sollen (Segmentfusion). Diese Vorgehensweise entspricht herkömmlichen Verfahren, wie z. B. dem sogenannten "Region growing".

Wenn die Segmente getrennt bleiben, wird überprüft, ob die Bildelemente, die den gemeinsamen Rand bilden, jeweils besser zu dem bisherigen oder besser zu dem Nachbarsegment gehören (Randkorrektur).

Es ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen den beiden gleichermaßen beteiligten Methoden "Segmentfusion" und "Randkorrektur". Beide Maßnahmen sind verantwortlich für die "Gestaltbildung" von Segmenten. Während aber die Segmentfusion Segmente erzeugt, indem sie kleinere Segmente auf der gleichen hierarchischen Ebene verbindet, so arbeitet die Randkorrektur auf der nächst tieferen Objektebene, indem sie Rand-Bildelemente umlagert (im Falle einer Segmentierung mit mehreren hierarchischen Ebenen lagert die Randkorrektur gegebenenfalls auch Bildsegmente um). Die Randkorrektur führt dazu, daß Segmentgrenzen verschoben werden, und wiederholt angewendet können Bildsegmente dadurch stark verändert werden.

Auf diese Weise wird das Bild vollständig segmentiert. Aufgrund der Geschichtlichkeit des erfindungsgemäßen Verfahrens ist der so erhaltene Segmentierungszustand allerdings noch nicht endgültig.

Die Tatsache, daß ein Segment durch Segmentfusion oder Randkorrektur verändert wurde, führt dazu, daß es seine Eigenschaften und damit die Homogenitätskriterien ändert. Bildelemente oder Nachbarsegmente, die vorher nicht zu dem Segment paßten, können nun zu ihm passen; umgekehrt können solche Bildelemente, die einmal in das Segment aufgenommen wurden, nun nicht mehr das (nun veränderte) Homogenitätskriterium mit dem Segment erfüllen. In dieser Weise werden laufend Segmente fusioniert, Randpunkte und damit Segmentränder verschoben oder nicht mehr passende Bildelemente aus einem Segment abgestoßen.

Die Abhängigkeit des jeweiligen Segmentierungszustandes von dem bisherigen Ablauf (Historizität des Verfahrens) wird dabei bewußt in Kauf genommen. Die iterative, zyklische Optimierung des Bildes führt dazu, daß der Endzustand wiederholbar von gleicher Art ist, obwohl es in Details leichte Unterschiede geben kann. Dies ändert aber nichts an der hohen Qualität der Endergebnisse.

Werden die Bildelemente in dem Bild in beschriebener Weise (und stochastischer Reihenfolge) immer wieder neu behandelt, so wird die Segmentierung nach und nach optimiert und konvergiert schließlich in einen stabilen Endzustand, der einem Gleichgewichtszustand unter gegebenen Bedingungen entspricht.

Die wesentlichen Vorteile und Anwendungsgebiete des erfindungsgemäßen Verfahrens können wie folgt zusammengefaßt werden:

- 5 - Das Verfahren arbeitet im Ggs. zu den meisten gebräuchlichen Methoden nicht mit Pixelklassifikation und anschließender Segmentierung, sondern es werden Bildelemente (Pixel) zunächst aufgrund von Homogenitätskriterien derart segmentiert, daß Bildstrukturen differentialdiagnostisch sinnvoll zusammengefaßt werden. Mit den so erhaltenen Segmenten steht wesentlich mehr Information für eine anschließende Klassifikation zur Verfügung als über einzelne Bildelemente. Die so möglichen Klassifikationswahrscheinlichkeiten können daher deutlich erhöht werden.
- 10 - Es wird eine große Unabhängigkeit von Vorwissen über das Bild und seine Strukturen dadurch erreicht, daß lokal bzw. objektbezogen modifizierte, d. h. selbsteinstellende Homogenitätskriterien verwendet werden;
 - es wird eine weitestgehende Verdichtung und Nutzung der vorliegenden Information erreicht; dies ist mit herkömmlichen Verfahren, die mit vordefinierten Teilbereichen oder Verteilungen im Merkmalsraum arbeiten, nicht möglich;
- 15 - es werden differentialdiagnostisch sehr gute Segmentierungsergebnisse erreicht; gleiche Strukturen werden gemeinsam segmentiert und von anderen Strukturen getrennt;
 - unterschiedlich texturierte Objekte werden auch dann klar abgegrenzt, wenn sie relativ breite und überlappende Merkmalsverteilungen aufweisen;
 - die Segmentierung kann weitgehend automatisiert durchgeführt werden;
- 20 - eine hierarchische Segmentierung gibt die Strukturen in unterschiedlicher Auflösungsdichte oder Detailliertheit wieder. Diese Informationen liegen gleichzeitig vor;

In vielen Fällen sind die Anforderungen an eine Segmentierung derart, daß ganz bestimmte bekannte Objekttypen festgestellt werden sollen. Im Gegensatz dazu stehen Verfahren, bei denen gesamte Bilder sinnvoll in ihre Bestandteile segmentiert werden.

Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren kann ein digitales Bild auch bei wenig Vorwissen vollständig und sehr detail-spezifisch segmentiert werden. Diese Segmentierung eignet sich dann sehr gut als Grundlage für eine semantische Klassifizierung. Von Vorteil ist dies in all den Fällen, in denen gleichartige Objekttypen sehr unterschiedliche Ausprägungen haben können (Satelliten- und Luftbilder, bei denen die jeweiligen Objekte abhängig von Jahres- und Tageszeit, Wetter usw. sind); in diesen Fällen würde eine reine Pixelklassifikation zu sehr ungenauen Zuordnungen führen.

Im Gegensatz dazu kann mit dem erfindungsgemäßen Verfahren eine Segmentierung durchgeführt werden, die durch die objektbezogenen Homogenitätskriterien differentialdiagnostisch sehr leistungsfähig arbeitet. Auch ohne detailliertes Vorwissen über das Bild und seine Strukturen werden zusammengehörige Bildstrukturen segmentiert, während unterschiedliche Bildstrukturen auch mit überlappenden Merkmalsverteilungen voneinander getrennt werden können. Die so erreichte Segmentierung stellt ein sehr viel besseres Material für eine Klassifizierung dar als eine Pixelklassifikation, da in ganzen Segmenten sehr viel mehr Information enthalten ist als in einzelnen Bildelementen (Merkmalsverteilungen, Textur, Form, Größe usw.). Diese zusätzliche Information kann helfen, die Klassifikationssicherheiten erheblich zu verbessern.

Die Erfindung wird nachstehend anhand der Beschreibung von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 sechs Objekte, die jeweils einen unterschiedlich großen Grauwertbereich (dessen Werteskala zwischen 0 und 256 liegt) aufweisen;

Fig. 2 die Fusionierung zweier Objekte; und

Fig. 3 eine Darstellung zur Erläuterung der erfindungsgemäßen Randkorrektur.

Nachfolgend werden zunächst einige Beispiele für objektbezogene Homogenitätskriterien gegeben. Wie bereits erläutert wurde, liegt ein zentrales Merkmal der erfindungsgemäßen Segmentierung in der objektbezogenen Modifizierung von Homogenitätskriterien.

Hier gibt es verschiedene Möglichkeiten, die aber alle die spezifische Merkmalsverteilung oder andere Eigenschaften, wie die Größe der Segmente, Textur, Form oder Ausrichtung, in Betracht ziehen.

Im einfachsten Fall fließt in das Homogenitätskriterium, das letztlich die Ähnlichkeit bzw. die Übereinstimmung zweier Segmente 1 und 2 beschreibt, der Mittelwert gemäß nachfolgender Gleichung ein:

$$|m_1 - m_2| < \alpha \quad (1)$$

55 Die obige Formel (1), in der mit α ein vorgegebener Faktor bezeichnet ist, der die Toleranzschwelle global für das gesamte Bild bestimmt und m_1 und m_2 die Mittelwerte der beteiligten Bildelemente bzw. Bildsegmente angeben, gibt somit an, daß der Unterschied der Mittelwerte m_1 und m_2 nicht größer sein darf als eine global vorgegebene Toleranz, nämlich der Wert α .

Die Genauigkeit der Segmentierung kann weiter verbessert werden, wenn das Homogenitätskriterium der Formel (1) 60 so geändert wird, daß zusätzlich Standardabweichung der Merkmalsverteilungen berücksichtigt wird, wie dies aus folgender Formel ersichtlich ist:

$$|m_1 - m_2| < \alpha (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2)$$

65 In dieser Formel (2) stellt der Wert α wiederum den vorgegebenen Faktor dar, der die Schärfe der Toleranz global für das gesamte Bild bestimmt, σ_1 und σ_2 sind die Standardabweichungen der zwei Segmente, während m_1 und m_2 entsprechend die Mittelwerte bezeichnen. Diese Bedingung besagt somit, daß der Unterschied im Mittelwert der beiden Segmente kleiner sein muß als die Summe der zwei Standardabweichungen, gewichtet mit einem allgemeinen Toleranzfaktor. Ist

die Bedingung erfüllt, werden die zwei Segmente als ähnlich erkannt und zu einem Segment zusammengefaßt. In diesem Fall sind die Mittelwerte die Merkmale der Segmente, auf die das Homogenitätskriterium angewendet wird, während σ_1 und σ_2 diejenigen Parameter sind, die den lokalen Objektbezug herstellen. Gleichzeitig drückt diese Bedingung einen selbstverstärkenden Effekt aus: sind die Standardabweichungen bisher schon relativ klein, müssen die Mittelwerte eng zusammenliegen, damit eine Fusion möglich ist. Sind die Verteilungen in den Segmenten demgegenüber breiter, kann der Unterschied im Mittelwert auch etwas größer sein.

Da kleine Segmente (ca. 1–5 Bildelemente bzw. Pixel) über keine oder noch keine repräsentative Standardabweichung verfügen, wird für solche kleinen Segmente stellvertretend eine Standardabweichung eingerechnet. Diese kann eine vorgegebene sein, sie kann aber auch z. B. aus der Standardabweichung des gesamten Bildes oder des entsprechenden Kontextes abgeleitet werden.

Wie aus Fig. 2 hervorgeht, hängt die Fusionierung zweier Segmente von den momentanen Eigenschaften der Segmente ab, und daher davon, inwieweit die Segmente bisher schon segmentiert wurde. Das Homogenitätskriterium gemäß Ungleichung (1) oder (2) bedeutet nämlich auch, daß sich die Ähnlichkeit eines Segmentes zu einem bestimmten anderen immer mit seiner momentanen Zusammensetzung ändert. Das heißt, daß die Segmentierung bei einem Verfahren, welches die Toleranzen immer wieder neu objektbezogen festlegt, ein historischer Prozeß ist: man beginnt mit einem Bildelement und nimmt sukzessive immer weitere hinzu. Mit jedem segmentierten Bildelement verändern sich die Objekteigenschaften und damit die Anlagerungsbedingungen für das anschließend folgende Bildelement. Ob also ein ganz bestimmtes Bildelement an ein ganz bestimmtes Objekt bzw. Bildsegment angelagert wird oder nicht, hängt wesentlich davon ab, welche Eigenschaften das Objekt bisher hat, und dies hängt wiederum davon ab, wieviel und welche Bereiche des Objektes bisher schon segmentiert wurden.

Nachfolgend werden Beispiele dafür gegeben, welchen zusätzlichen Einfluß die Segmentgröße bei der Segmentfusion hat.

Ausgehend von einem relativ großen Objekt, das segmentiert werden soll, entsprechen kleine Segmente zu Beginn der Segmentierungsprozesses kleinen Stichproben und größere Segmente größeren Stichproben aus der Gesamtverteilung des Objektes.

Je kleiner die Segmente sind, um so größer ist die mittlere Abweichung ihrer Mittelwerte von dem Verteilungsmittelwert des Objektes. Bei Bildsegmenten, die lediglich aus einem einzigen Bildelement bestehen, ist dies definitionsgemäß die Standardabweichung der Gesamtverteilung des Objektes. Umgekehrt entspricht die Verteilung größerer Segmente dagegen schon sehr viel besser der Gesamtverteilung des Objektes. Generell bedeutet dies, daß aufgrund der Merkmalsverteilungen größerer Segmente viel sicherere und präzisere Entscheidungen getroffen werden können als aufgrund der Merkmalsverteilungen kleinerer Segmente. Gleichzeitig ist der Fehler, der entsteht, wenn große Segmente falsch fusioniert werden, wesentlich größer, als der durch die Fusion von kleinen Segmenten.

Die Bindungstoleranzen zwischen großen Objekten bzw. Bildsegmenten sollten daher bei ansonsten gleichen Verteilungseigenschaften schärfer sein als zwischen kleinen Objekten. Dementsprechend muß die Größe der Bildsegmente beim Fusionieren berücksichtigt werden. Dies wird erfindungsgemäß beispielsweise dadurch erreicht, daß Ungleichung (2) wie folgt weiter differenziert wird:

$$|m_1 - m_2| < \alpha \frac{1}{n_{\min}^{\epsilon}} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3)$$

In dieser Ungleichung bezeichnet n_{\min} die Größe des kleineren der beiden Segmente in der Anzahl der Bildelemente, und ϵ einen global vorzugebenden Parameter, der angibt, wie stark die Größe der Objekte das Kriterium beeinflussen soll. Ist $\epsilon = 0$, so wird die Größe der Segmente nicht berücksichtigt; je größer ϵ gewählt wird, um so größer wird der Unterschied zwischen der Toleranz bei der Segmentierung kleinerer Segmente und der Schärfe bei der Segmentierung größerer Segmente.

Nachfolgend wird ein Beispiel für ein Kriterium gegeben, das den Unterschied in den Mittelwerten und in den Standardabweichungen bewertet. In ähnlicher Weise wie in Ungleichung (3) kann zusätzlich die Ähnlichkeit in den Standardabweichungen in das Homogenitätskriterium einbezogen werden. Man erhält dann folgende Beziehung, die zwei Ungleichungen enthält, die gleichzeitig erfüllt sein müssen (\wedge ist der logische UND-Operator):

$$|m_1 - m_2| < \alpha \frac{1}{n_{\min}^{\epsilon}} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad \wedge \quad |\sigma_1 - \sigma_2| < \beta \frac{1}{(\sqrt{n_1 + n_2})^{\epsilon}} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (4)$$

In dieser Formel ist mit β ein global vorgegebener Parameter bezeichnet, während n_1 und n_2 die Anzahl der Bildelemente der beiden benachbarten Bildsegmente bezeichnen.

Nunmehr werden einige Beispiele für die erfindungsgemäße Randkorrektur gegeben: Es kann leicht der Fall sein, daß zwei nebeneinanderliegende (benachbarte) Segmente zwar nicht fusionieren, daß jedoch ein bestimmtes Rand-Bildelement potentiell sowohl zu dem einen als auch zu dem anderen Segment gehören könnte. Für diesen Fall wird eine Randkorrektur durchgeführt: Es wird demgemäß überprüft, zu welchem der beiden Segmente der Bildelement besser paßt.

Zu diesem Zweck wird für jedes der beiden Segmente aus dem Merkmals-Mittelwert m und der Standardabweichung σ eine Normalverteilung der Merkmale angenommen; man erhält dann folgende Beziehung:

$$\theta = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2} \frac{(x-m)^2}{\sigma^2}}$$

(5)

Aus dieser Normalverteilung ergibt sich der Erwartungswert θ , mit dem das Merkmal x des Bildelements, dessen Zugehörigkeit festgestellt werden soll, in jeder der beiden Verteilungen angetroffen werden kann. Der Erwartungswert gibt dann direkt die Zugehörigkeit zu dem jeweiligen Segment (Maximum-Likelihood-Kriterium) an. Ist die Zugehörigkeit zum Nachbarsegment größer als zu dem bisherigen, so wird der Bildelement aus seinem bisherigen Segment gelöst und dem Nachbarsegment zugeordnet.

Nachstehend werden Beispiele für die Behandlung der Homogenitätskriterien beim Segmentieren über mehrere Kanäle erläutert. Unter dem Begriff "Kanal" soll in diesem Zusammenhang verstanden werden, daß das betreffende Bild aus mehreren Einzelbildern (d. h. Kanälen) mit unterschiedlichem Informationsgehalt besteht.

Steht ein Digitales Bild in mehreren Kanälen zur Verfügung, so stellt sich die Frage, wie eine Gesamtentscheidung aus der Überprüfung der Homogenitätskriterien, die bei jeder Entscheidung jeweils über jeden Kanal anfallen, getroffen werden kann.

Bei der Segmentfusion ist hierbei ein Absolutkriterium geeignet: das Homogenitätskriterium muß in jedem Kanal erfüllt sein, sonst wird nicht fusioniert. Dadurch ist eine gute Informationsnutzung gewährleistet: selbst wenn das Homogenitätskriterium in vielen Kanälen erfüllt ist, bedeutet doch der Unterschied in einem weiteren Kanal, daß die zugrundeliegenden Bildstrukturen unterschiedlich sind. Dann würde die Segmentfusion zu einem Fehler führen.

Bei der Randkorrektur (siehe hierzu auch Fig. 3) ergibt sich über jeden Kanal eine Zugehörigkeitswahrscheinlichkeit des Bildelementes zu einem Segment. Die Gesamt-Zugehörigkeitswahrscheinlichkeit ergibt sich aus dem geometrischen Mittel der einzelnen Zugehörigkeitswahrscheinlichkeiten in jedem Kanal. Dies bedeutet, daß bis zu einem gewissen Grad eine schlechtere Zugehörigkeitswahrscheinlichkeit in einem Kanal durch eine gute in einem anderen kompensiert werden kann. Sollte die Zugehörigkeit in einem Kanal allerdings besonders schlecht sein, so drückt sich dies in einer geometrischen Mittelung trotz guter Zugehörigkeit in anderen Kanälen gut aus.

Nachfolgend wird ein detailliertes Beispiel für einen Bearbeitungsablauf gegeben.

Wird ein digitales Bild mit Hilfe eines Filters behandelt, der das Bild systematisch Zeile für Zeile abläuft, jedes Bildelement genau einmal behandelt und dieses, wenn möglich, mit seiner Umgebung segmentiert, so ist der derart erreichbare Zustand der Segmentierung eines digitalen Bildes mit Hilfe der oben beschriebenen objektbezogenen Toleranzen aufgrund der Geschichtlichkeit des Prozesses nicht optimal (siehe hierzu auch die Fig. 2); durch das Abtasten bzw. Scannen des Bildes entsteht ein systematischer Fehler.

Statt dessen wird erfindungsgemäß ein Verfahren verwendet, das innerhalb eines Bearbeitungszyklus jedes Bildelement eines Bildes behandelt, dies aber in einer stochastischen Reihenfolge. Es soll hier betont sein, daß der prinzipielle Ablauf dieses Algorithmus unabhängig ist von der Art der Homogenitätskriterien.

Alle einzelnen Bildelemente werden zunächst als einpixlige Segmente behandelt, wobei größere Segmente dadurch entstehen, daß Segmente – das können ein- oder mehrpixlige sein – aufgrund von Nachbarschaftlichkeit und Ähnlichkeit zusammengefaßt (fusioniert) werden.

Für jedes Bildelement p sieht die Bearbeitung folgendermaßen aus:

Wenn das Bildelement p noch nicht segmentiert ist, wird ein einpixliges Segment mit diesem Bildelement erzeugt.

Abspaltung: Wenn das Bildelement p schon segmentiert ist, wird überprüft, ob es noch zu seinem Segment paßt; denn das Segment kann sich, seitdem das Bildelement p Bestandteil wurde, durch Anlagerung anderer Bildelemente oder Fusionierung mit anderen Segmenten in solch einer Weise verändert haben, daß das Bildelement p nicht mehr das Homogenitätskriterium mit dem Segment erfüllt. Dafür wird das Segment so behandelt, als ob p nicht Bestandteil wäre, und das Bildelement p wird so behandelt, als ob es ein einpixliges Segment wäre. Gegebenenfalls wird p aus dem Segment entfernt, und ein neues, einpixliges Segment mit dem Bildelement erzeugt. Die Abspaltung ist ein symmetrischer Mechanismus zur Segmentfusion.

Im nächsten Schritt werden nacheinander alle diejenigen direkten Nachbar-Bildelemente des Bildelementes p behandelt, die zu einem fremden Segment gehören (n_p). Wenn es mindestens ein solches Nachbar-Bildelement n_p gibt, so bedeutet dies, daß das Bildelement p und das Nachbar-Bildelement n_p jeweils Randpunkte verschiedener Segmente sind. Ansonsten geht der Algorithmus zu dem nächsten Bildelement über.

Für jeden Nachbarpunkt n_p , der zu einem Nachbarsegment gehört, wird wie folgt vorgegangen:

Fusion: Der Algorithmus entscheidet, ob die nachbarschaftlichen Segmente das Homogenitätskriterium erfüllen und fusioniert sie gegebenenfalls zu einem größeren Segment.
Randkorrektur: Falls dies nicht passiert ist, führt der Algorithmus eine Randkorrektur durch: er überprüft, ob das Bildelement p besser zu seinem bisherigen oder besser zu dem durch das Nachbar-Bildelement n_p repräsentierten Segment paßt. Ist die Ähnlichkeit zwischen dem Bildelement p und seinem Nachbarsegment n_p größer als zu dem bisherigen Segment, so erfolgt eine Umlagerung. Wichtig ist bei diesem Vergleich der Ähnlichkeiten, daß die Eigenschaften des Segmentes, dem das Bildelement p angehört, berechnet werden ohne das Bildelement p ; nur so kann ein wirklicher Vergleich der Zugehörigkeiten des Bildelementes p zu beiden Segmenten erfolgen.

Die Tatsache, daß ein Segment mittlerweile an anderer Stelle verändert wurde, kann dazu führen, daß es seine Eigenschaften geändert hat: daß Bildelemente, die vorher nicht zu dem Segment paßten, nun besser zu ihm passen, oder umgekehrt, daß Bildelemente abgestoßen werden; oder auch, daß es mit einem Nachbarsegment fusioniert, zu dem es bisher nicht ähnlich war (siehe hierzu Fig. 2). In dieser Weise werden laufend Segmente fusioniert, Randpunkte (und damit Segmentränder) verschoben oder nicht mehr passende Bildelemente aus einem Segment abgestoßen.

Bei Entfernen eines Bildelementes aus einem Segment ist streng darauf zu achten, daß der weitere Zusammenhang des

Segmentes gewährleistet ist. Gegebenenfalls ist das Segment in kleinere, aber zusammenhängende Segmente zu trennen. Nach mehreren Optimierungszyklen konvergiert der Segmentierungsprozeß nach und nach in einen stabilen Zustand, in dem die Ränder stabil bleiben, obwohl der Algorithmus weiterhin das Bild abläuft und versucht, die Segmente zu optimieren. Dieser Endzustand ist dann ein Gleichgewichtszustand bzw. ein Attraktor der Segmentierung bei gegebenen Toleranzen.

Eine Ausführungsform eines entsprechenden algorithmischen Steuerungsablaufs ist wie folgt:

- 1 Laufe in stochastischer Reihenfolge jedes Bildelement p des Bildes ab
 - 1.1 (wenn Bildelement p ein Randpunkt eines Segmentes oder ein noch nicht behandeltes Bildelement ist)
 - 1.1.1 wenn Bildelement p noch nicht segmentiert ist
 - 1.1.1.1 mache ein neues, einpixliges Segment mit Bildelement p.
 - 1.1.1.1.1 entferne Bildelement p aus dem bisherigen Segment
 - 1.1.1.2 mache ein neues, einpixliges Segment mit Bildelement p
 - 1.1.1.2.1 entferne Bildelement p aus dem bisherigen Segment
 - 1.1.2 (wenn Bildelement p ein Randpunkt eines Segmentes oder ein noch nicht behandeltes Bildelement ist)
 - 1.1.2.1 Für jedes Nachbar-Bildelement, das sich in direkter Nachbarschaft von Bildelement p befindet
 - 1.1.2.1.1 wenn das Nachbar-Bildelement ein Bildelement eines fremden Segmentes ist
 - 1.1.2.1.1.1 wenn die beiden Segmente ähnlich sind
 - 1.1.2.1.1.1.1 fusioniere die beiden Segmente
 - 1.1.2.1.1.2 wenn die beiden Segmente nicht ähnlich sind
 - 1.1.2.1.1.2.1 wenn Bildelement p besser zu dem Nachbarsegment paßt als zu dem eigenen
 - 1.1.2.1.1.2.1.1 entferne Bildelement p aus seinem Segment
 - 1.1.2.1.1.2.1.2 füge Bildelement p dem Nachbarsegment zu.

Erläuterungen hierzu:

- ad 1.1:
- Diese Zeile ist dann erforderlich, wenn es sich um einen reinen Randkorrektur-Algorithmus handelt. In diesem Fall fällt dann Zeile 1.1.3 weg. Wenn auch Bildelemente im Innern von Segmenten auf ihre Zugehörigkeit zum Segment überprüft werden sollen, entfällt diese Zeile, dafür muß Zeile 1.1.3 bleiben.
- ad 1.1.2 und 1.1.3.1.1.2.1:
- Die Funktion, die die Ähnlichkeit zwischen zwei Segmenten oder die Zugehörigkeit eines Bildelementes zu einem Segment bewertet, muß beachten, daß dann, wenn die Zugehörigkeit eines schon segmentierten Bildelementes zu seinem Segment zu bewerten ist, das Segment so behandelt werden muß, als ob das Bildelement nicht schon Bestandteil wäre.
- ad 1.1.2:
- Die Vergleichsfunktion, die die Zugehörigkeit eines Bildelementes zu seinem bisherigen Objekt bestimmt, mit der Folge, das Bildelement aus seinem bisherigen Segment zu lösen und ein eigenes Segment zu bilden, muß symmetrisch zu der Funktion sein, die die Ähnlichkeit zweier Segmente mit der Folge einer Fusion der beiden Segmente bestimmt (Gleichung (2) und Schritte 1.1.3.1.1.1 und 1.1.3.1.1.2). Das Bildelement muß für den Vergleich so behandelt werden, als wäre es nicht Bestandteil seines Segmentes, sondern ein eigenes, einpixliges Segment.
- ad 1.1.3.1.1.1 und dazugehörige weitere Schritte: Segmentfusion.
- ad 1.1.3.1.1.2 und dazugehörige weitere Schritte: Randkorrektur.
- ad 1.1.3.1.1.2.1.1:
- Bei Entfernung eines Bildelementes aus einem Segment muß darauf geachtet werden, daß das Segment weiterhin zusammenhängend ist. Gegebenenfalls muß im Fall einer Trennung das Segment in die einzelnen zusammenhängenden Bruchstücke aufgeteilt werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Segmentieren eines aus einer Vielzahl einzelner Bildelemente (Pixel) bestehenden digitalen Bildes, bei dem insbesondere zur digitalen Bildverarbeitung und/oder zur Objekt- und/oder Mustererkennung Bildsegmente dadurch gebildet werden, daß immer dann einzelne benachbarte Bildelemente und/oder Bildsegmente zusammengefaßt oder bereits gebildete Bildsegmente durch Abspaltung von Bildelementen und/oder Teil-Bildsegmenten modifiziert werden, wenn ein Merkmal oder mehrere Merkmale benachbarter Bildelemente bzw. Bildsegmente anhand bestimmter Homogenitätskriterien als übereinstimmend (gleich oder ähnlich) bzw. als nicht übereinstimmend eingestuft werden, **dadurch gekennzeichnet**, daß als Homogenitätskriterium für jedes betrachtete Merkmal eine Toleranz herangezogen wird, innerhalb der sich die Merkmalswerte der beiden betroffenen Bildelemente bzw. Bildsegmente unterscheiden dürfen, und daß die Segmentierung iterativ über alle Bildelemente bzw. Bildsegmente wiederholt durchgeführt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Bildsegmente in einer hierarchischen Objektstruktur vorliegen, wobei sich auf der untersten (ersten) hierarchischen Ebene die Bildelemente befinden, die dann zumindest auf der nächst höheren (zweiten) hierarchischen Ebene zu einem Bildsegment zusammengefaßt werden.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Bildsegmente als Teil-Bildsegmente auf hierarchischen Ebene zusammengefaßt werden.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die jeweilige Schärfe der in den Homogenitätskriterien herangezogenen Toleranz durch eine oder mehrere Eigenschaften der beteiligten Bildelemente

bzw. Bildsegmente lokal modifiziert wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Bildelemente bzw. Bildsegmente in stochastischer oder pseudo-stochastischer Reihenfolge bearbeitet werden.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß ein Bildsegment dann durch Fusion mit anderen Bildsegmenten auf der gleichen hierarchischen Ebene (Segmentfusion) und/oder durch Aufnahme von Bildelementen bzw. von nachbarschaftlichen Bildsegmenten der nächst tieferen hierarchischen Ebene verändert wird (Anlagerung), wenn die Homogenitätskriterien erfüllt sind.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß ein Bildsegment durch Fusion mit denjenigen nachbarschaftlichen Bildsegment auf der gleichen hierarchischen Ebene dann verändert wird, mit dem die Homogenitätskriterien am besten erfüllt sind, wenn auch für dieses nachbarschaftliche Bildsegment die Homogenitätskriterien im Vergleich zu seinen anderen Nachbarsegmenten am besten erfüllt sind (Segmentfusion).

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Bildsegmente durch Abstoßung von Bildelementen und/oder Teil-Bildsegmenten verändert werden, wenn die Homogenitätskriterien zwischen dem abzustößenden Bildelement bzw. Teil-Bildsegment und dem Rest des ursprünglichen Bildsegmentes nicht mehr erfüllt sind (Abstoßung).

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß ein Bildelement oder ein Teil-Bildsegment, das sich am Rand eines Bildsegmentes befindet und die Homogenitätskriterien sowohl mit dem bisherigen als auch mit einem oder mehreren Nachbarsegmenten erfüllt, demjenigen Segment zugeordnet wird, mit dem die Homogenitätskriterien am besten erfüllt sind (Randkorrektur).

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Segmentfusion (Fusion zweier Segmente auf der gleichen hierarchischen Ebene), die Anlagerung (Anlagerung eines Bildelementes bzw. eines nachbarschaftlichen Bildsegmentes der nächst tieferen hierarchischen Ebene), die Abstoßung (Abstoßung eines Bildelementes bzw. eines nachbarschaftlichen Bildsegmentes der nächst tieferen hierarchischen Ebene) und/oder die Randkorrektur (Austausch eines am Rand eines Bildsegmentes gelegenen Bildelementes bzw. Teil-Bildsegmentes der nächst tieferen hierarchischen Ebene) auf allen hierarchischen Ebenen der Objektstruktur in gleicher Weise, vorzugsweise in fraktaler Weise, angewendet werden.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die hierarchische Bearbeitungsreihenfolge zunächst bei der höchsten hierarchischen Ebene beginnt und dann schrittweise tiefere Ebenen behandelt.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Iteration solange wiederholt wird, bis eine stabile oder annähernd stabile Segmentbildung erzielt worden ist.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1, 2 oder 4 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß im Homogenitätskriterium festgelegt wird, daß der Unterschied der Mittelwerte kleiner ist als eine global vorgegebene Toleranz.

14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß als Homogenitätskriterium folgende Ungleichung herangezogen wird:

$$|m_1 - m_2| < \alpha \quad (1)$$

wobei mit α ein vorgegebener Faktor bezeichnet ist, der die Toleranzschwelle global für das gesamte Bild bestimmt und m_1 und m_2 die Mittelwerte der beteiligten Bildelemente bzw. Bildsegmente angeben.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß im Homogenitätskriterium festgelegt wird, daß der Unterschied der Mittelwerte kleiner ist als die Summe der beteiligten Standardabweichungen multipliziert mit einem global vorgegebenen Toleranzfaktor.

16. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß als Homogenitätskriterium folgende Ungleichung herangezogen wird:

$$|m_1 - m_2| < \alpha (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2)$$

wobei mit α ein vorgegebener Faktor bezeichnet ist, der die Toleranzschwelle global für das gesamte Bild bestimmt, σ_1 und σ_2 die Standardabweichung zweier benachbarter Bildelemente bzw. Bildsegmente bezeichnen und m_1 und m_2 die Mittelwerte dieser Bildelemente bzw. Bildsegmente angeben.

17. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Toleranz gemäß Ungleichung (1) zusätzlich mit der Größe des kleineren der beteiligten beiden Segmente verschärft wird.

18. Verfahren nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Ungleichung (2) wie folgt modifiziert wird:

$$|m_1 - m_2| < \alpha \frac{1}{n_{\min}^\epsilon} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3)$$

wobei mit ϵ ein global vorgegebener Parameter bezeichnet ist und n_{\min} die Anzahl der Bildelemente des kleineren der beiden benachbarten Bildsegmente bezeichnet.

19. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich zu dem Merkmal "Mittelwert" in ähnlicher Weise auch das Merkmal "Standardabweichung" verglichen wird.

20. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß als Homogenitätskriterium folgende zwei Ungleichungen herangezogen werden, die gleichzeitig erfüllt sein müssen:

$$|m_1 - m_2| < \alpha \frac{1}{n_{\min}^\epsilon} (\sigma_1 + \sigma_2) \wedge |\sigma_1 - \sigma_2| < \beta \frac{1}{n_{\min}^\epsilon} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (4)$$

wobei mit β ein global vorgegebener Parameter bezeichnet ist.

21. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 20, insbesondere nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß immer dann, wenn ein Rand-Bildelement das Homogenitätskriterium sowohl mit dem bisherigen als auch mit mindestens einem benachbarten Bildsegment erfüllt, derart die Merkmalsverteilungen der beteiligten Bildsegmente berechnet werden und hieraus die Zugehörigkeit des betreffenden Rand-Bildelements ermittelt wird, daß das Rand-Bildelement demjenigen Bildsegment zugeordnet wird, in dem der Merkmalswert am häufigsten auftritt, oder daß aus der Auftretenshäufigkeit in den verschiedenen Segmenten Wahrscheinlichkeiten berechnet werden, über die das Bildsegment probabilistisch einem der Segmente zugeordnet wird. 5
22. Verfahren nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß für die Merkmalsverteilung das jeweilige Histogramm der Merkmale der beteiligten Bildsegmente herangezogen wird.
23. Verfahren nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß als Merkmalsverteilung eine Normalverteilung der Merkmale der Bildsegmente gemäß folgender Formel angenommen wird: 10

$$\vartheta = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2} \frac{(x-m)^2}{\sigma^2}}$$

(5)

15

in der mit ϑ der Erwartungswert bezeichnet ist.

24. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß jedesmal dann, wenn bei der Randkorrektur ein Bildelement oder ein Bildsegment der nächst tieferen hierarchischen Ebene von einem Bildsegment a in ein anderes Bildsegment umgelagert wird, die Zusammenhängendheit des Bildsegmentes a überprüft wird, und bei Nicht-Zusammenhängendheit das Bildsegment a in die entsprechenden, durch die Trennung entstandenen zusammenhängenden Bildsegmente aufgeteilt wird. 20
25. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 24, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Randkorrektur die zeitliche Abarbeitung der Rand-Bildelemente in zwei Schritten erfolgt: 25
- a) vom Beginn der Segmentierung bis zu einem Iterationsschritt, bei dem die erzeugten Segmente die vollständige Bildfläche überdecken, wird die Bearbeitung in einer stochastischen oder pseudo-stochastischen Reihenfolge durchgeführt.
 - b) daran anschließend wird das Bild in einer deterministischen Reihenfolge weiterbearbeitet, derart, daß die Rand-Bildelemente beginnend mit der größten Zugehörigkeitsdifferenz in der Reihenfolge fallender Zugehörigkeitsdifferenz abgearbeitet werden, 30
- wobei die Zugehörigkeitsdifferenz eines Rand-Bildelements die maximale Differenz seiner aufgrund eines Homogenitätskriteriums berechneten Zugehörigkeit zum bisherigen Bildsegment zur Zugehörigkeit irgendeines benachbarten Bildsegments bezeichnet. 35
26. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 25, bei dem das zu segmentierende digitale Bild aus mehreren Einzelbildern (Kanälen) mit unterschiedlichem Informationsgehalt besteht, dadurch gekennzeichnet, daß nur dann einzelne Bildelemente und/oder Bildsegmente zusammengefaßt werden, wenn das herangezogene Homogenitätskriterium jeweils für alle Kanäle erfüllt wird.
27. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 25, bei dem das zu segmentierende digitale Bild aus mehreren Einzelbildern (Kanälen) mit unterschiedlichem Informationsgehalt besteht, dadurch gekennzeichnet, daß nur dann Rand-Bildelemente aus einem Bildsegment entfernt und dem nachbarschaftlich angrenzenden Bildsegment zugeordnet werden, wenn die Zugehörigkeit zu dem nachbarschaftlich angrenzenden Bildsegment über alle Kanäle gemittelt größer ist als die Zugehörigkeit zu dem bisherigen Bildsegment über alle Kanäle gemittelt. 40
28. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 27, dadurch gekennzeichnet, daß für kleine Bildsegmente (d. h. Bildsegmente mit 1 bis ca. 5 Bildelementen) eine vorgegebene Standardabweichung eingerechnet wird. 45
29. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 28, insbesondere nach Anspruch 2, bei dem die Segmentierung zum Schluß in einer hierarchischen Struktur mit mehreren Segmentierungsebenen vorliegt, dadurch gekennzeichnet, daß zunächst mit sehr offenen globalen Toleranzfaktoren segmentiert wird, wodurch das Bild in grobe Bildstrukturen segmentiert wird, und daß in weiteren Schritten jedes einzelne so erhaltene Bildsegment wiederum segmentiert wird, jedoch mit schärferen globalen Toleranzfaktoren, wodurch feinere Bildstrukturen segmentiert werden, die 50
- daß die Segmentierung mit zunehmender Hierarchisierungsstufe eine zunehmende Detailgenauigkeit wiedergibt.
30. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 28, dadurch gekennzeichnet, daß zunächst mit sehr scharfen globalen Toleranzfaktoren fusioniert wird, wodurch das Bild zunächst in feine Bildstrukturen segmentiert wird, und daß in weiteren Schritten die so erhaltenen Bildsegmente mit sukzessive offeneren globalen Toleranzfaktoren weiter zusammengefaßt werden, bis die gewünschte Größenordnung von Segmenten erreicht ist. 55
31. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 28, insbesondere nach Anspruch 2, bei dem die Segmentierung zum Schluß in einer hierarchischen Struktur mit mehreren Segmentierungsebenen vorliegt, dadurch gekennzeichnet, daß zunächst mit sehr scharfen globalen Toleranzfaktoren segmentiert wird, wodurch das Bild zunächst in feine Bildstrukturen segmentiert wird, und daß in weiteren Schritten die so erhaltenen Bildsegmente auf einer neuen Segmentierungsebene mit offeneren globalen Toleranzfaktoren zusammengefaßt werden, wodurch gröbere Bildstrukturen entstehen, die dem Bildsegment in hierarchischer Weise übergeordnet werden, und so weiter bis zur Ebene des gesamten Bildes. 60
32. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 31, dadurch gekennzeichnet, daß für die Bestimmung von Segmenteigenschaften bei ausreichend großen Bildsegmenten nicht die Rand-Bildelemente herangezogen werden, da deren Grau- oder Farbwerte häufig eine Mittelung zwischen den dem Bildsegment entsprechenden und den angrenzenden Bildstrukturen ist. 65

33. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 32, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Fusion von Bildsegmenten zusätzlich zu den genannten Homogenitätskriterien andere hinzugezogen werden, die die Zusammengehörigkeit der Bildsegmente aufgrund von solchen Texturmerkmalen bestimmen, die über die Standardabweichung der Farbverteilungen hinausgehen
34. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 33, dadurch gekennzeichnet, daß bei Fusion oder Randkorrektur abhängig von Formkriterien der beteiligten Segmente (z. B. Kompaktheit, Größe, Randrauhigkeit) verschiedene Homogenitätskriterien verwendet werden.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

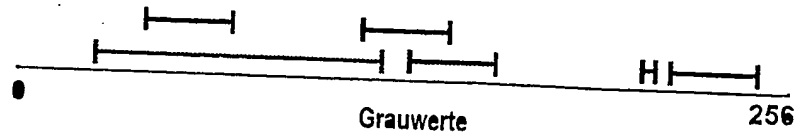


Fig.1



Fig.2

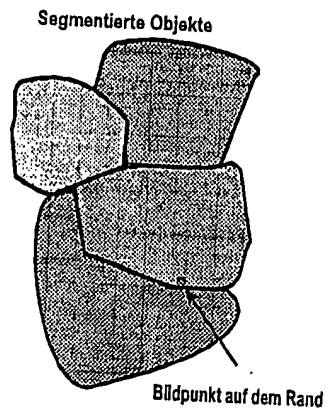


Fig.3